

# 一、物質の三態

## 1. 状態変化

固体  $\rightleftharpoons$  液体  $\rightleftharpoons$  気体 の間で起こる状態変化：

- 融解（固体  $\rightarrow$  液体）／凝固（液体  $\rightarrow$  固体）
- 蒸発・沸騰（液体  $\rightarrow$  気体）／凝縮（気体  $\rightarrow$  液体）
- 凝華（固体  $\rightarrow$  気体）／昇華（気体  $\rightarrow$  固体）

水の加熱による温度変化とエネルギー：

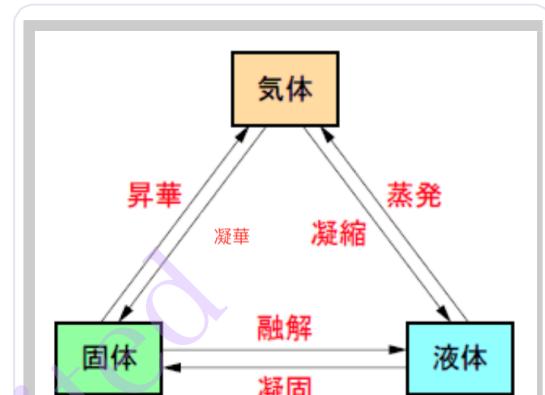


図 501 三態と主な状態変化

- 融点付近：固体  $\rightarrow$  固体と液体（融解；融解熱）
- 液体の加熱：温度上昇
- 沸点付近：液体  $\rightarrow$  液体と気体（沸騰；蒸発熱）
- 気体の加熱：温度上昇

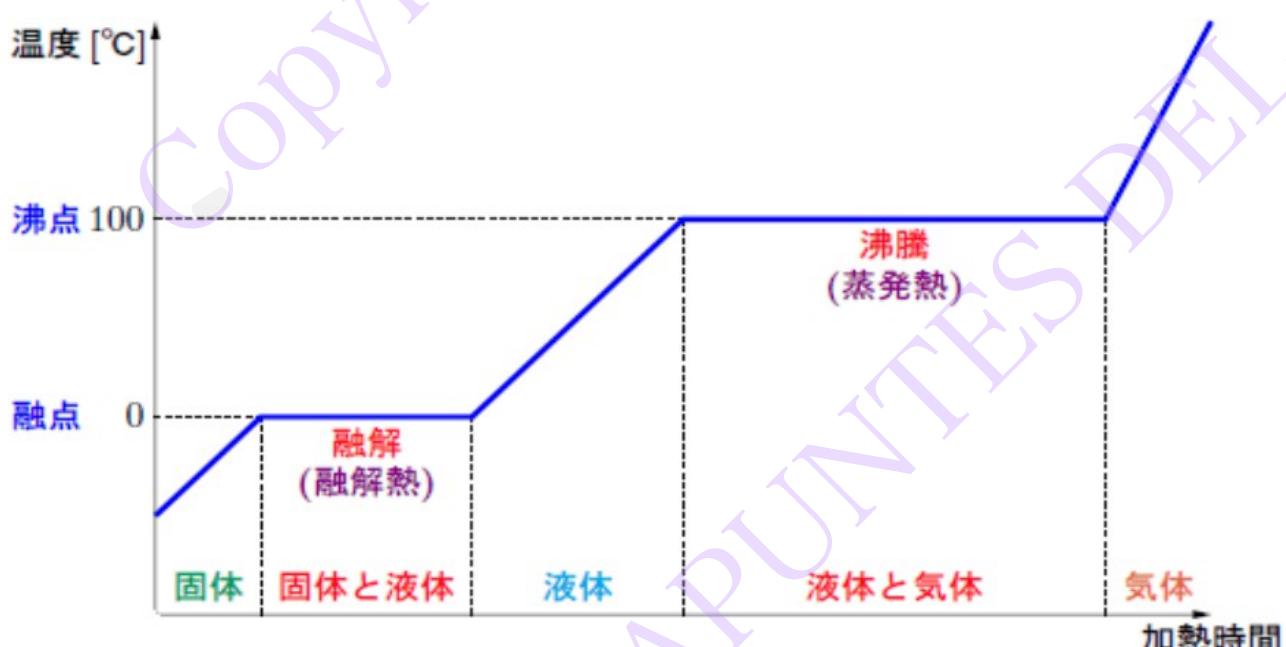


図 502 水の状態変化とエネルギー（温度 vs 加熱時間）

## 2. 状態図：純物質の状態は温度と圧力で決まる

例：水 ( $H_2O$ ) の状態図

- 蒸気圧曲線／融解曲線／昇華圧曲線
- 三重点：固体・液体・気体が共存できる唯一の点
- 超臨界状態：臨界点を超えると液体と気体の区別がなくなる

### 比較：水と二酸化炭素の状態図

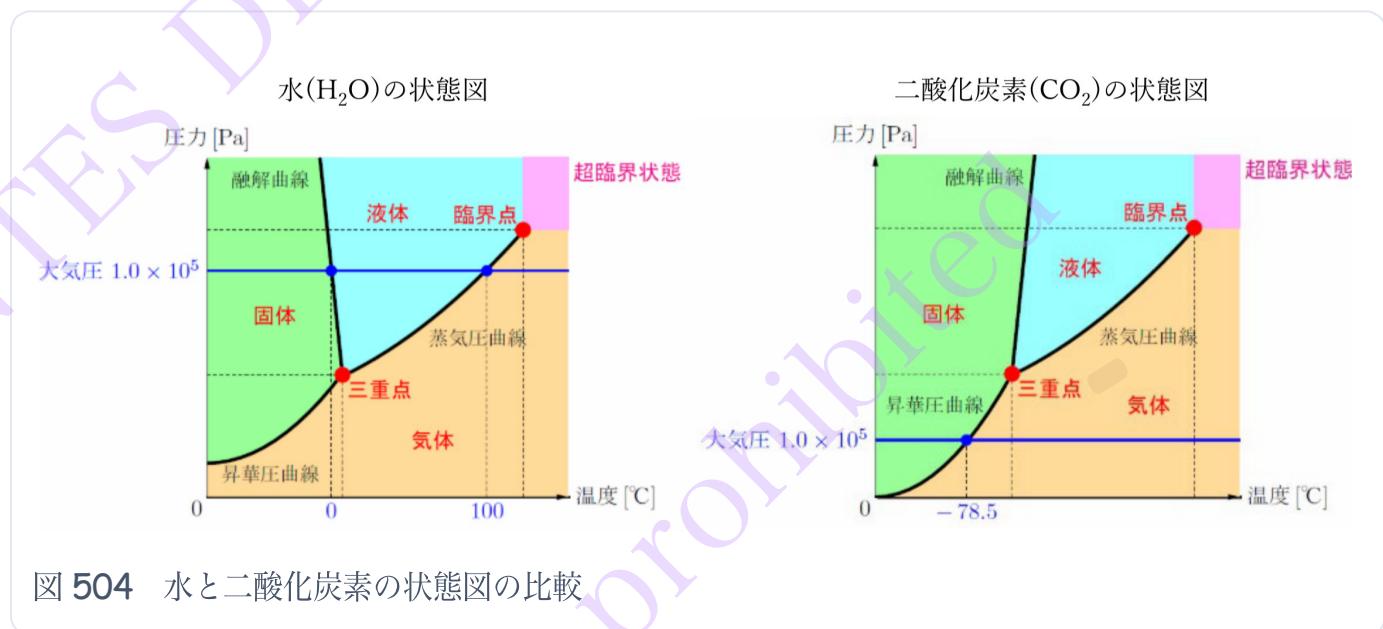


図 504 水と二酸化炭素の状態図の比較

## 二、基礎の確認・気体の性質

### 1. 粒子の拡散と熱運動

- ・拡散：物質の粒子が自由に散らばって全体に広がる現象。
- ・熱運動：物質を構成する粒子が絶えず不規則に運動している。この運動を熱運動という。

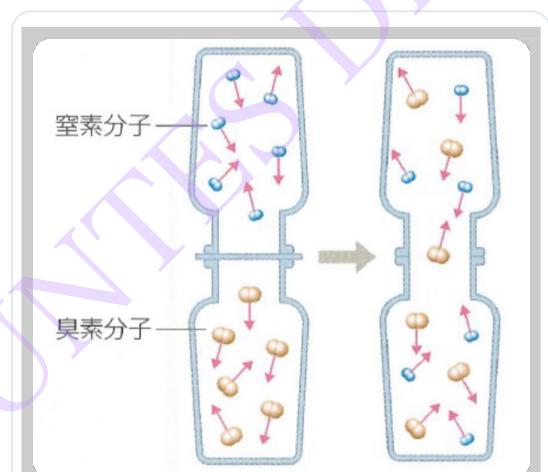


図 506 分子の熱運動モデル

## 2. 温度

- ・温度：熱運動の激しさに対応しているもの（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）。

※ 温度が高いほど、粒子の熱運動は激しい。

- ・分子の速度分布：

- ・絶対温度  $T$ ：セルシウス温度  $t$  に 273 を足したもの（単位： $\text{K}$ ）。

$$T [\text{K}] = t [{}^{\circ}\text{C}] + 273$$

## 3. ボイルの法則（温度一定）

温度一定のとき、一定物質量の気体の体積  $V$  は圧力  $P$  に反比例。

例：

温度を一定に保ったまま、 $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  で  $10 \text{ L}$  の気体を  $15 \text{ L}$  の容器に入れると、圧力は何  $\text{Pa}$  になるか。

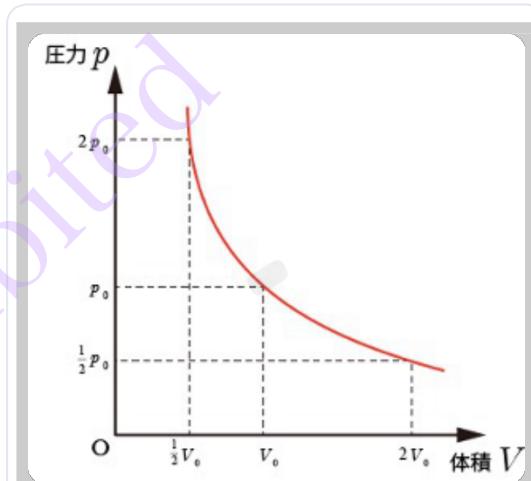


図 509 ボイルの法則 ( $P$ - $V$  曲線)

## 4. シャルルの法則（圧力一定）

圧力一定のとき、一定物質量の体積  $V$  は絶対温度  $T$  に比例。

例：

圧力を一定に保ったまま、 $27^{\circ}\text{C}$  で  $6 \text{ L}$  の気体を  $-73^{\circ}\text{C}$  に冷却すると、体積は何  $\text{L}$  になるか。

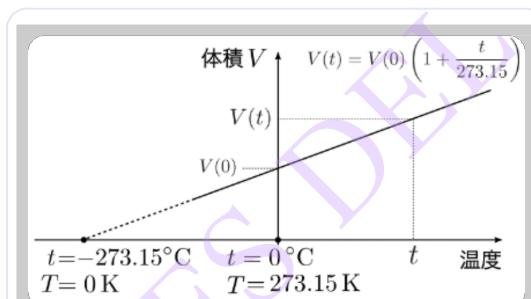


図 510 シャルルの法則 ( $V$ - $t$  直線)

## 5. ボイル・シャルルの法則

ボイル・シャルルの法則

$$PV/T = k_3 \text{ (一定)}$$

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$$

一定物質量の気体で、 $V$  は  $P$  に反比例し、 $T$  に比例。

例：

27°C・ $2.0 \times 10^5$  Pa で 5.0 L を占める気体がある。

この気体を 87°C・ $1.0 \times 10^5$  Pa にすると、体積は何 L になるか。

## 標準状態と気体定数 R

標準状態 (0°C,  $1.013 \times 10^5$  Pa) で 1 mol の体積 = 22.4 L。

気体定数 R (普遍定数)

- $R = 8.314\ 462\ 618\dots\ J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
- 換算 :  $R \approx 0.082057\ L \cdot atm \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1} \approx 8.314\ kPa \cdot L \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$

## 6. 気体の状態方程式

$$PV = nRT$$

### 練習問題 (状態方程式の応用)

例 1：気体定数  $R=8.31 \times 10^3\ Pa \cdot L/(K \cdot mol)=0.082\ atm \cdot L/(K \cdot mol)$  とし、以下の問を答えよ。

27 °C で 1.6 mol の窒素 N<sub>2</sub> を容器に入れ、圧力を  $2.0 \times 10^5$  Pa とした。このとき窒素の密度 (density) は何 g/L か。最も近い値を、次の①～⑤の中から一つ選びなさい。

6 g/L

- ① 1.1      ② 2.2      ③ 3.3      ④ 4.4      ⑤ 5.5

図 513 問6：密度 (g/L) を求める

例2： 気体定数  $R=8.31 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{L}/(\text{K}\cdot\text{mol})=0.082 \text{ atm}\cdot\text{L}/(\text{K}\cdot\text{mol})$  とし、以下の問を答えよ。

組成式 (empirical formula)  $\text{C}_3\text{H}_5$  で表される化合物 A を容積 100 mL の容器に入れて 100°C に加熱し、完全に気体にした。その質量 (mass) を 1 atm のもとで計ると 268 mg であった。化合物 A の分子式を次の①～⑥の中から一つ選びなさい。ただし、1 atm =  $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  とする。

4

- ①  $\text{C}_3\text{H}_5$     ②  $\text{C}_3\text{H}_6$     ③  $\text{C}_3\text{H}_8$     ④  $\text{C}_6\text{H}_{10}$     ⑤  $\text{C}_6\text{H}_{12}$     ⑥  $\text{C}_9\text{H}_{15}$

図 514 問4：分子式の決定

## 7. 理想気体と実在気体

	理想気体	実在気体
$PV = nRT$	厳密に従う。	厳密には従わない。
分子自身の体積	0 と仮定する。	存在する。
分子間力	0 と仮定する。	存在する。
低温・高圧	常に気体。	液体や固体に変化。

図 515 理想気体と実在気体

※ 実在気体は、高温・低圧、また分子量が小さいほど、理想気体として近似できる。

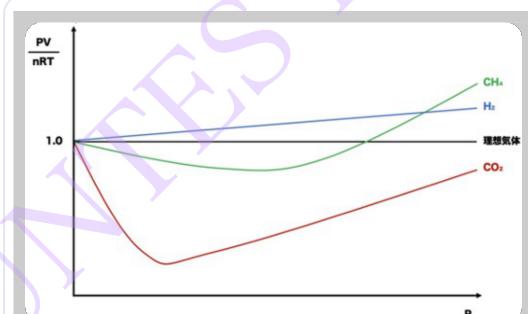
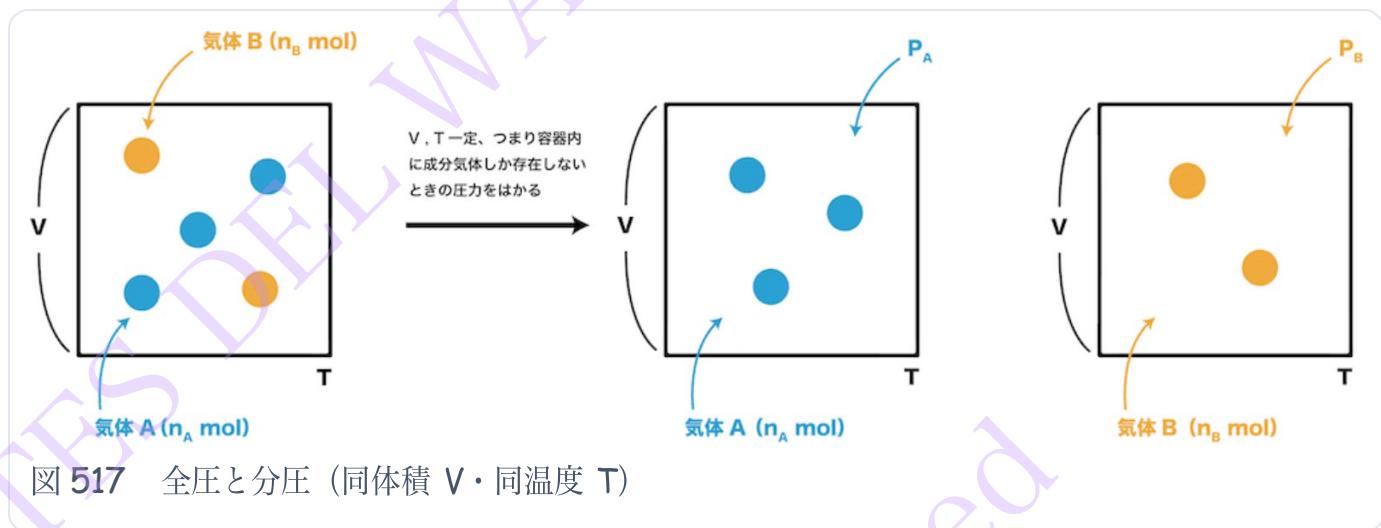


図 516 実在気体のずれ ( $PV/nRT$  の圧力依存)

### 三、混合気体

#### 1. 全圧と分圧



全圧：混合気体全体が示す圧力。

分圧：混合気体と同じ体積を占める各成分気体が示す圧力。

#### 2. ドルトンの分圧の法則

混合気体の全圧は、各成分の分圧の和。

$$\left\{ \begin{array}{l} P = P_A + P_B \\ \end{array} \right.$$

#### 3. 分圧の計算

##### (1) 分圧と物質量

分圧の比は物質量の比に等しい。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_A / P_B = n_A / n_B \\ \end{array} \right.$$

##### (2) 分圧とモル分率

$$P_A = (n_A / (n_A + n_B)) \times P$$

#### 4. 混合気体の平均分子量

$$\left\{ \begin{array}{l} M = (n_A / (n_A + n_B)) M_A + (n_B / (n_A + n_B)) M_B \\ \end{array} \right.$$

例：空気の平均分子量

## 練習問題（混合気体）

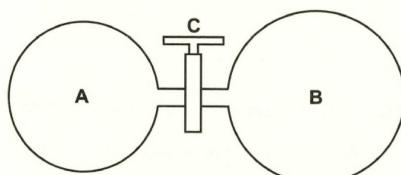
問6 22.4 L の容器に、0°Cでヘリウム He 1.60 g と酸素 O<sub>2</sub> x g が入っているときの圧力が  $1.0 \times 10^5$  Pa であった。x に最も近い値を、次の①～⑤の中から一つ選びなさい。

6 g

- ① 9.6    ② 12.8    ③ 19.2    ④ 25.6    ⑤ 38.4

図520 問6：混合気体の質量

2.0 L の容器 A と 3.0 L の容器 B がコック C でつながっている。容器 A には  $1.0 \times 10^5$  Pa の酸素 O<sub>2</sub>、容器 B には  $2.0 \times 10^5$  Pa の窒素 N<sub>2</sub> が入っている。温度一定のまま、コック C を開けて気体を均一に (homogeneously) 混合したとき、混合気体中の酸素の分圧 (partial pressure) および混合気体の全圧 (total pressure) として正しい組み合わせを、下表の①～⑥の中から一つ選びなさい。



	酸素の分圧 [Pa]	全圧 [Pa]
①	$4.0 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$
②	$4.0 \times 10^4$	$1.6 \times 10^5$
③	$4.0 \times 10^4$	$1.8 \times 10^5$
④	$8.0 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$
⑤	$8.0 \times 10^4$	$1.6 \times 10^5$
⑥	$8.0 \times 10^4$	$1.8 \times 10^5$

図521 例3：酸素の分圧と全圧

問13 温度  $T_0$ において、ある容器に 0.01 mol の C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> と 0.09 mol の O<sub>2</sub>を入れると、容器内の圧力は  $P_0$  になった。これに点火 (ignition) して、完全燃焼 (perfect combustion) させた後、温度を  $T_0$  に戻すと圧力は  $P_1$  になった。このとき、 $P_1/P_0$  の値として正しいものを下の①～⑥の中から一つ選びなさい。

ただし容器内では 気体の液化 (liquefaction) は起こらず、気体は理想気体 (ideal gas) としてふるまうものとする。

13

- ① 0.8    ② 0.9    ③ 1.0    ④ 1.1    ⑤ 1.2    ⑥ 1.3

図522 問13：完全燃焼後の圧力比

# 四、気体・液体間の状態変化

## 1. 蒸発

液体の分子が表面から気体になる現象。どの温度でも起こる。

- 気液平衡：蒸発と凝縮の速度が等しく、見かけ上、変化が起こらない状態。
- (飽和) 蒸気圧：気液平衡にあるときの蒸気の圧力。

一定温度の蒸気圧は物質ごとに一定で、他の気体が共存しても変わらない。

蒸気圧は温度だけに依存し、高いほど大きい。

- ・ 蒸気圧曲線：液体の蒸気圧と温度との関係を示したグラフ。

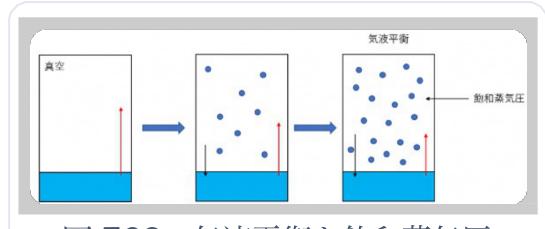


図 523 気液平衡と飽和蒸気圧

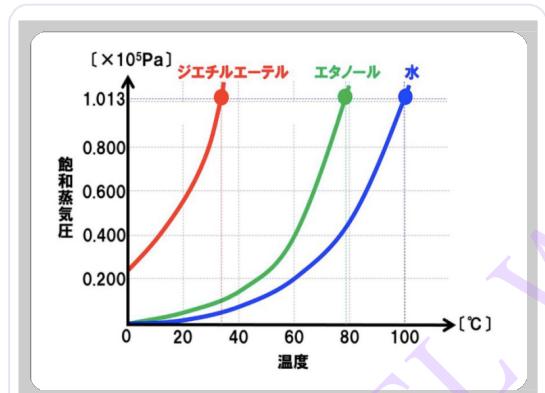


図 524 蒸気圧と温度の関係

## 練習問題（蒸気圧）

問6 体積を変えられる密閉容器（closed container）に、水素  $H_2$  を  $1.0 \times 10^{-3}$  mol と酸素  $O_2$  を  $5.0 \times 10^{-3}$  mol 入れて点火した。水素は完全に反応して、容器内に水滴が生じた。一定温度  $33^\circ\text{C}$  で、容器の体積を少しずつ大きくしていくと、容器内のすべての水  $H_2O$  が水蒸気（water vapor）となった。そのときの容器の体積は何 L か。最も近い値を、次の①～⑤の中から一つ選びなさい。ただし、 $33^\circ\text{C}$ での水の蒸気圧（vapor pressure）は  $5.0 \times 10^3 \text{ Pa}$  とする。

6 L

- ① 0.50    ② 0.75    ③ 1.0    ④ 1.5    ⑤ 2.0

図 525 問6:  $33^\circ\text{C}$  の水の蒸気圧を用いて体積を求める

問5 ピストン付きの容器に水のみを封入し、容積を  $V [\text{L}]$  にすると、水はすべて蒸発し、容器内の圧力は  $P_A [\text{Pa}]$  となった。次に、温度を一定に保ちながら、ピストンを押して容器の容積を小さくしていったところ、容積が  $\frac{V}{2} [\text{L}]$  になったときに液体の水が観察され始め、このとき圧力は  $P_B [\text{Pa}]$  であった。さらに、容積を  $\frac{V}{4} [\text{L}]$  にしたとき、圧力は  $P_C [\text{Pa}]$  であった。 $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  の大小関係として最も適当なものを、次の①～⑥のうちから一つ選べ。

5

- ①  $P_A < P_B < P_C$     ②  $P_A = P_B < P_C$     ③  $P_A < P_B = P_C$   
④  $P_A > P_B > P_C$     ⑤  $P_A = P_B > P_C$     ⑥  $P_A > P_B = P_C$

図 526 問5:  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  の大小